Rasche Messungen von Sondencharakteristiken einer Gasentladung mittelst Oszillographenröhre

---

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung
der Philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

Jakob Dürrwang

aus Basel

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser & Cie.
1935

Rasche Messungen von Sondencharakteristiken einer Gasentladung mittelst Oszillographenröhre

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der philosophischen Doktorwürde
vorgelegt der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung
der Philosophischen Fakultät der Universität Basel

von

Jakob Dürrwang

aus Basel

BASEL
Buchdruckerei Emil Birkhäuser & Cie.
1935

Genehmigt von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung der philosophischen Fakultät auf Antrag der Herren Professoren Dr. A. Hagenbach und Dr. M. Wehrli.

Basel, den 26. Februar 1935.

Prof. Dr. A. Portmann
Dekan.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderabdruck aus Helvetica Physica Acta, VIII. Jahrgang, Nr. 4, 1935.

Rasche Messungen von Sondencharakteristiken einer Gasentladung mittelst Oszillographenröhre.

Inhalt: Unter Verwendung einer Kathodenstrahl-Röhre wird eine Methode ausgearbeitet, womit die Strom-Spannungs-Kurven einer Sonde (Langmuir'sche Sondencharakteristiken) in 0,1 bis 1 sec. photographiert werden können. An der Sonde liegt eine Wechselspannung. Die bei der frühern Methode punktweiser Messung auftretenden systematischen Fehler werden vermieden, und die neue Methode kann in Fällen verwendet werden, wo die alte vollständig versagt. Oberhalb einer kritischen Frequenz ergeben die beiden Methoden Differenzen, die genauer diskutiert werden; unterhalb dieser Grenze (ca. 100 Hertz) sind die Kurven in beiden Fällen identisch.

Beim offenen Kohlebogen können Raumpotentiale, Elektronen- und Ionenstromdichten gemessen werden. Führt man in diesen Bogen Halogen-Salze der Metalle Na, Cu, Cd, Zn ein, so ergibt sich eine typische Veränderung der Sondencharakteristiken, welche auf die verschiedene Ionisierungsspannung obiger Metalle zurückgeführt werden kann.

Im Wolfram-Stickstoffbogen bildet sich der Anodenfall bei Vergrösserung der Bogenlänge in zwei Stufen aus (16 und 38 Volt) und bleibt dann oberhalb einer gewissen Bogenlänge konstant. Die zweistufige Anodenfall-Ausbildung kann auch an der Sonde beobachtet werden.

Unter Zuziehung früherer Ergebnisse gelingt es, die Lage des Raumpotentials auf der Sondencharakteristik bei höherem Gasdruck definitiv festzulegen.

§ 1. Einleitung.

Nach J. Langmuir lassen sich aus der Strom-Spannungskurve einer Sonde, welche in eine Gasentladung getaucht wird, das Raumpotential sowie die Elektronen- und Ionenstromdichte bestimmen[1]). — Zur Aufnahme einer solchen „Sondencharakteristik" legt man in der Regel ein Amperemeter in Serie mit der Sonde und erteilt letzterer z. B. gegen die Anode eine variable negative Vorspannung. Dabei ist Sorge zu tragen, dass die auf die Kathode fliessende Stromstärke konstant bleibt. Trägt man das negative Sondenpotential $-U_S$ auf der Abszisse nach links und die Sondenstromstärke I_S auf der Ordinate nach oben auf,

[1]) Näheres hierzu z. B. in der „Einführung in die Physik der Gasentladungen" von R. Seeliger.

wenn der Strom im äussern Kreis auf die Sonde zu fliesst, so zeigt eine solche „(I_S, U_S)-Kurve" normalerweise den in Fig. 1 schematisch dargestellten Verlauf.

Im folgenden wird in Übereinstimmung mit J. Langmuir angenommen, dass das Raumpotential, welches am Orte der Sonde vorhanden ist, in der Nähe von Punkt B, d. h. nahe dem „Knie" der Sondencharakteristik liegt. In dem links von Punkt A gelegenen Ast der (I_S, U_S) Kurve treffen auf der Sonde vornehmlich Ionen auf, sodass diese Seite der Charakteristik als Ionenstromteil bezeichnet wird. Im Gegensatz dazu schliesst rechts von

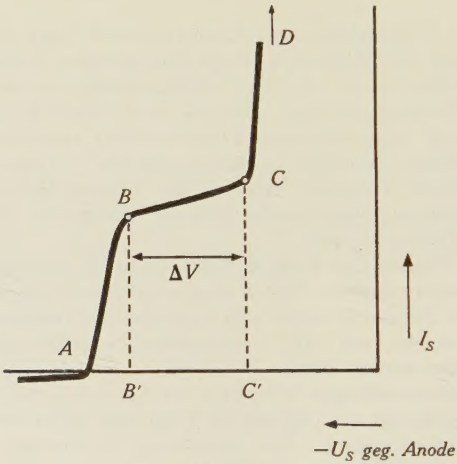


Fig. 1.
Schematische Darstellung einer (J_S, U_S)-Charakteristik (Haupt-Typus).

Punkt A der „Elektronenstromteil" an, denn es fliessen dort in erster Linie Elektronen auf die Sonde.

Wehrli, Bächtiger und Sibold[1]) haben im stabilen Wolfram-Stickstoffbogen nach der üblichen „statischen" Methode bis zu Betriebsstromstärken von 0,5 Ampere gemessen. Es wurde also für eine beschränkte Anzahl von Sondenpotentialen die zugehörigen Sondenströme ermittelt und nachträglich die Charakteristiken aufgezeichnet. Bei dieser Messmethode benötigt die Aufnahme einer vollständigen Sondencharakteristik einen beträchtlichen Zeitaufwand, sodass im Wolfram-Stickstoffbogen infolge Kathodenzerstäubung und wegen starker Erwärmung von Füllgas und Kolben, und ferner im offenen Kohlebogen durch das Abbrennen

[1]) M. Wehrli, Helv. Phys. Acta **3**, 180, 1930. M. Wehrli und P. Bächtiger, Helv. Phys. Acta **4**, 290, 1931. M. Wehrli und A. Sibold, Helv. Phys. Acta **6**, 265, 1933.

der Elektroden reproduzierbare Messungen erschwert, beim Kohlebogen verunmöglicht werden. Es erscheint darum vorteilhaft, solche Charakteristiken unter Verwendung einer BRAUN'schen Röhre zu messen. Statt der Sonde einzelne willkürlich gewählte Spannungen aufzuprägen, wird man an sie eine geeignete Wechselspannung anlegen, und z. B. bei der Frequenz 50 Hertz direkt den Fluoreszenzfleck des Oszillographen die dynamische Sondencharakteristik aufzeichnen lassen. Diese „dynamische Messmethode" ist infolge der Zeitersparnis, die sie im Vergleich zur statischen Messung bietet, ganz allgemein am Platze, wenn sehr viele solcher Charakteristiken aufgenommen werden sollen. — Da es nach diesem Verfahren, bei Verwendung eines lichtstarken Hochspannungsoszillographen durchaus möglich ist, solche Charakteristiken z. B. in Bruchteilen einer hundertstel Sekunde photographisch zu registrieren, kommt der Messung derartiger dynamischer (I_S, U_S)-Kurven auch für die Technik Bedeutung zu. So können nach diesem Prinzip auch zeitlich rasch veränderliche Gasentladungen, wie z. B. der Wechselstrom-Lichtbogen und der Abreissbogen mit Hilfe von Sondenmessungen untersucht werden.

Beim Wolfram-Stickstoff- und beim Kohlebogen sind sowohl Gasdruck als auch Stromstärke der Grössenordnung nach von den Vorbedingungen, unter welchen LANGMUIR gearbeitet hat, verschieden. Aus diesem Grunde bleibt zunächst unsicher, ob auch für diese Bogenentladungen die Festlegung des Raumpotentials nach LANGMUIR den vorliegenden Verhältnissen entspricht. — Nun erscheint das hier beschriebene Verfahren zur raschen Aufnahme von Sondencharakteristiken ganz besonders geeignet, um die Frage nach der Lage des Raumpotentials auf der Sondencharakteristik abzuklären. Es sei darum schon hier darauf hingewiesen, dass es tatsächlich am Schluss dieser Arbeit gelingt, an Hand des gesammelten Materials zu zeigen, dass die von LANGMUIR übernommene Raumpotential-Festlegung auch unter diesen veränderten Vorbedingungen richtig ist.

§ 2. Apparatur und Messmethode.

Schaltung. Fig. 2 gibt einen Überblick über die verwendete Schaltung. Die Kathode K und die Anode A der Bogenentladung sind mit dem Betriebstromkreis I in Verbindung. Die Stromquelle besteht bei Messungen am Wolfram-Stickstoffbogen aus der Hochspannungsmaschine H des Instituts, deren Spannung durch Variation des Erregerstroms beliebig eingestellt werden kann. Ein Widerstand R von 3500 Ohm dient erstens zur Stabili-

sierung der Entladung (entsprechend der Kaufmann'schen Stabilitätsbedingung) und ermöglicht zweitens im Zusammenhang mit dem Kondensator C von 12 μF Kapazität, die an sich beträchtliche Welligkeit des Generatorstroms herabzusetzen. Die verbleibende Wechselstromkomponente beträgt weniger als 1 Prozent des Gleichstromanteils und wirkt sich bei den Messungen nicht störend aus. Bogenspannung U und Stromstärke I werden mit zwei Siemens-Präzisionsinstrumenten gemessen. Bei Messungen am Kohlebogen tritt an Stelle der Hochspannungsmaschine H ein 220 Volt Gleichstromgenerator, der mit einem Kondensator von

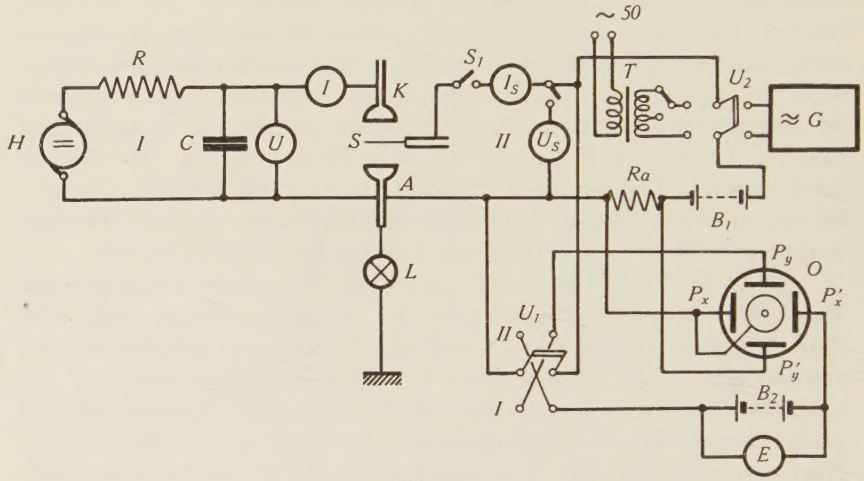


Fig. 2.
Schaltschema.

24 μF überbrückt wird. — Zwischen der Sonde S und der Anode A ist der eigentliche Messkreis II angeschaltet. Der Sonde wird mit Hilfe des Umschalters U_2 gegen Anode eine Wechselspannung aufgeprägt, die in der Regel die Frequenz 50 Hertz hat und dem Transformator T entnommen wird; in speziellen Fällen tritt der Röhrengenerator G in Funktion, der Frequenzen zwischen 100 und 10000 Hertz zu liefern vermag. In Serie mit dem Sondenstromkreis liegt eine Batterie B_1, welche die „Ruhespannung" der Sonde festlegt, ferner der Ohm'sche Widerstand Ra, ein Schalter S_1 und zu Kontrollzwecken ein Milliamperemeter I_S. Über Ra tritt ein dem Sondenstrom proportionaler Spannungsabfall auf, der über dem Vertikalablenkplattenpaar P_y, P_y' der Oszillographenröhre O liegt, und deren Elektronenstrahl in der Ordinatenrichtung ablenkt. Der Umschalter U_1 liegt bei Aufnahme der Charakteristik in Position I. Da in diesem Falle gleichzeitig

über dem Horizontalablenkplattenpaar P_x, P_x' der Braun'schen Röhre neben einer Vorspannung E das auf Anode bezogene Sondenpotential U_S liegt, so beschreibt der Fluoreszenzfleck des Oszillographen direkt die gesuchte dynamische Sondencharakteristik. Weil zur Auswertung dieser Kurve noch die Lage von Abszisse und Ordinate, und die Empfindlichkeit des Oszillographen bekannt sein müssen, so sind in der Schaltung entsprechende Vorkehrungen getroffen worden. Um z. B. zu erreichen, dass der Fluoreszenzfleck die Abszisse aufzeichnet, braucht nur Schalter S_1 geöffnet zu werden, während U_1 in Position I verbleibt. Nach dem Umschalten auf Position II wird die Ordinate erhalten, denn die Wechselspannung liegt dann über P_y, P_y', während über P_x, P_x' einzig noch die Vorspannung E verbleibt. Die Empfindlichkeit eines Kathodenstrahloszillographen hängt stark von seinen Betriebsdaten ab, sodass unmittelbar nach jeder Messung eine Eichung durchgeführt wird. Wenn man berücksichtigt, dass das Verhältnis der Empfindlichkeiten bei Ablenkung des Elektronenstrahls in der X- bzw. Y-Axenrichtung nur von den geometrischen Abmessungen des Oszillographen abhängt und darum für ein gegebenes Exemplar konstant ist, so erkennt man, dass sich eine Eichung jederzeit sehr rasch durchführen lässt. Es genügt z. B. neben dem Null-Punkt der Abszisse, der dort liegt, wo letztere von der Ordinate geschnitten wird, einen einzigen weitern Abszissenwert zu ermitteln. Zu diesem Zweck bleibt U_1 in Stellung II, dagegen wird die Spannung E um einen passend gewählten Wert ΔE verändert. Der Fluoreszenzfleck bestreicht dann eine Gerade, die gegenüber der Ordinate verschoben erscheint; der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Abszisse legt den an E abgelesenen Eichwert ΔE fest. Diese eine Eichmarke ist ausreichend, weil die Empfindlichkeit moderner Oszillographenröhren weitgehend von der Strahlablenkung unabhängig ist. — Die Anoden von Bogenentladung und Oszillographenröhre sind gemeinsam über eine Sicherungslampe L geerdet.

Bogenentladung. Der grösste Teil der Messungen wird am Wolfram-Stickstoffbogen ausgeführt; es soll darum kurz auf die verwendete Anordnung hingewiesen werden. Der offene Kohlebogen sowie eine Spezialausführung einer Natrium-Kleinlampe, die ebenfalls für gewisse Messungen herbeigezogen werden, sollen bei Behandlung der entsprechenden Messergebnisse in § 4 bzw. § 5 besprochen werden. Wo eine spezielle Feinregulierung der Bogenlänge nicht erforderlich war, gelangte die schon von M. Wehrli[1]) angegebene Elektrodenanordnung zur Anwendung. Bei

[1]) M. Wehrli, Helv. Phys. Acta **3**, 180, 1930.

spätern Messungen, bei welchen unter anderm Bogenlänge-Spannungskurven aufzunehmen waren, stand mir die Anordnung zur Verfügung, die Bächtiger und Wehrli[1]) speziell für solche Zwecke konstruiert haben; sie zeichnet sich dadurch aus, dass mittelst eines Fettschliffs eine Mikrometerschraube betätigt werden kann, die eine feine Regulierung der Elektrodendistanz zulässt. Ein seitlicher Schliff zum Einführen einer Sonde war bei diesem Entladungsgefäss bereits vorgesehen. Als Füllgas dient technischer Stickstoff, der gut getrocknet und gereinigt worden ist. Zu diesem Zweck wird der technische Stickstoff zunächst über stark erhitzte Kupfergaze geleitet und dadurch vom Sauerstoff befreit. Eine mit Ätzkali gefüllte Röhre reinigt das N_2 von CO_2, worauf der Stickstoff durch zwei Trockenröhren (P_2O_5) dem Kolben zugeleitet wird. Sorgfältige Trocknung des Stickstoffs hat sich auch in diesem Falle als Hauptforderung erwiesen. Die Elektroden bestehen entweder aus Wolframstäben oder aus Wolframdrähten mit halbkugelförmigen Enden. Als Sonden gelangen Wolframdrähte von 0,2 mm Durchmesser zur Verwendung.

Oszillographen-Apparatur. Als Kathodenstrahl-Oszillograph stand mir in erster Linie ein Modell von M. v. Ardenne (Herstellungsjahr 1930) zur Verfügung; als schliesslich die Punktschärfe bei diesem Exemplar infolge Erschöpfung der wirksamen Kathodenschicht nachliess, trat an seine Stelle eine Braun'sche Röhre Modell Kinne. Beide Modelle sind prinzipiell gleich konstruiert und ergeben dieselben Resultate. Die Heizung erfolgt aus einem 2 Volt Accumulator unter Zwischenschaltung eines feinregulierbaren Widerstandes von 2 Ohm. Zur Herstellung der Anodenspannung von 1000—2000 Volt wird ein Vollweggleichrichter mit nachfolgendem Siebkreis verwendet. Aus demselben Gerät wird auch die negative Vorspannung für den Striktionszylinder des Oszillographen entnommen; sie wird über einem im Anodenkreis liegenden Widerstand abgenommen. Alle Charakteristiken sind erst aufgenommen worden, nachdem der Oszillograph während mindestens fünf Minuten eingeschaltet war. Während dieser Zeitspanne kann die Heizstromstärke jeweilen trotz gleichbleibender Punktschärfe wesentlich reduziert werden. Die Anode der Oszillographenröhre liegt stets an Erde, und die Braun'sche Röhre befindet sich zur Fernhaltung störender magnetischer Streufelder innerhalb einer Eisentrommel von 12 mm Wandstärke. Bei niedriger Anodenspannung lassen sich die Messungen

[1]) P. Bächtiger und M. Wehrli, Helv. Phys. Acta **4**, 32, 1931.

auf 1,5 Volt genau durchführen und sind auch innerhalb dieser Genauigkeit reproduzierbar.

Wechselstromgenerator für höhere Frequenzen. Es wird die Dreipunkt- oder Hartley-Schaltung verwendet. Als Röhre dient eine Telefunken RV 218, die mit einer Anodenspannung von 440 Volt betrieben wird. Die Selbstinduktion besteht aus einer mehrlagig gewickelten, mit verschiedenen Abgriffen versehenen Zylinderspule, in welche ein lamellierter Eisenkern eingeführt werden kann. Parallel zur Selbstinduktion liegt ein stufenweise variabler Kondensator von minimal 2000 cm und maximal 0,1 μF Kapazität. Der Messkreis wird über eine weitere Spule induktiv angekoppelt. Bei der Messung können sich Schwierigkeiten ergeben, sobald die Amplituden der Oberschwingungen nicht hinreichend klein bleiben. Wie sich herausgestellt hat, ist diese Schwierigkeit zu umgehen, wenn zwischen der Selbstinduktion und der Kapazität des Schwingkreises immer ein günstiges Verhältnis gewählt wird. Die Frequenzbestimmung erfolgt durch Abhören des tonfrequenten Stromes mittelst Lautsprecher und durch Vergleich mit einem Satz geeichter Stimmgabeln bzw. Koenig'scher Klangstäbe.

Aufnahme der Sondencharakteristiken. Nachdem Bogenentladung und Oszillograph während 5 Minuten eingebrannt worden sind, wird die Sonde in den Bogen eingeführt. Schalter S_1 (Fig. 2) ist geschlossen, U_1 steht in Position I und U_2 möge beispielsweise am Transformator T liegen. Der Widerstand *Ra* hat bei Aufnahmen im Elektronenstromteil der Sondencharakteristik einen Wert von 1000 Ohm und besteht aus einem weitgehend selbstinduktionsfreien Drahtwiderstand. Es wird ein „Silko"-Widerstandsband verwendet, d. h. ein textiles Gewebe, welches als Einschlag einen feinen Konstantandraht enthält. Durch Erteilung einer geeigneten Ruhespannung aus Batterie B_1 und durch Wahl einer passenden Wechselspannungsamplitude wird der gewünschte Teil der Charakteristik auf dem Fluoreszenzschirm entworfen, wobei die Spannung E so eingestellt wird, dass der sichtbar gemachte Kurventeil in die Mitte des Oszillographenschirmes zu liegen kommt. Falls die Charakteristik quantitativ ausgewertet werden soll, so wird sie photographisch festgehalten. Zu diesem Zweck steht eine Voigtländer-Kamera mit einem Objektiv der Öffnung 3,5 zur Verfügung. Bei Verwendung von Lumière-Opta-Platten, deren spektrale Empfindlichkeitsverteilung dem Fluoreszenzlicht gut angepasst ist, wird normalerweise (bei 1000 Volt Anodenspannung) 1 Sekunde exponiert. Unmittelbar danach

werden Abszisse und Ordinate, sowie mindestens eine Eichmarke mit photographiert. Auf einer 9/12 Platte lassen sich 6 Charakteristiken registrieren.

Korrekturen. M. Wehrli (l. c.) hat sich ausführlich mit den Korrekturen befasst, die bei der Auswertung statisch gemessener Sondencharakteristiken anzubringen sind. Im vorliegenden Falle wird das Sondenpotential auf die Anode bezogen, und es muss der zur Kathode fliessende Strom konstant gehalten werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass bei Aufnahme des Elektronenstromteils der Charakteristik die Sonde der Bogenstrecke Sonde-Anode Strom entzieht, und darum zu einer Vergrösserung der Gesamtspannung U führt. Bei den vorliegenden dynamischen Messungen (vgl. § 1) ist es umständlich, den zur Kathode fliessenden Strom durch äussere Mittel konstant zu halten, und ebenso wäre eine verlässliche Gesamtspannungs-Korrektion nur schwer anzubringen. Nun zeigt sich aber, dass, sofern die Maximal-Stromschwankungen ΔI_S im Sondenkreis (verglichen mit der Gesamtstromstärke I) klein bleiben, auf eine Korrektur verzichtet werden kann. Zur Ermittlung der Schwankungen der Gesamtstromstärke I und der Bogenspannung U wird eine zweite Braun'sche Röhre im Hauptstromkreis der Bogenentladung eingeschaltet.

Aus Tabelle I ist zu ersehen, wie in einem typischen Fall (Wolfram-Stickstoffbogen) Gesamtstromstärke I und Spannung U variieren, wenn im Sondenkreis Stromstärke-Schwankungen ΔI_S von 120 mA erzwungen werden. Es bedeuten dabei ΔI die maximale Schwankung des Gesamtstroms, ΔU die Schwankung der Gesamt-

Tabelle I.

Gesamtstromstärke-Schwankungen.

I	ΔI_S	ΔI	ΔI_0	$\Delta I_0/I\%$
0,35 A	120 mA	8,3 mA	4,15 mA	1,2
0,5	120	9	4,5	0,9

Schwankungen der Gesamtspannung.

I	U	ΔI_S	ΔU	ΔU_0	$\Delta U_0/U\%$
0,35 A	105 V	120 mA	0,5 V	0,25 V	0,25
0,5	87,5	120	$<0{,}5$ V	—	—

Wolfram-Stickstoffbogen, p = 151 mm Hg, Halbkugelelektroden, Bogenlänge $l = 1{,}3$ mm, Abstand Sonde-Kathode $\Delta l = 0{,}2$ mm, Frequenz $n = 50$ Hz.

spannung. Ferner stellen ΔI_0 und ΔU_0 die Scheitelwerte der auftretenden Wechselstrom- bzw. Wechselspannungs-Komponenten dar. Wie aus der letzten Kolonne hervorgeht, ist der dem Hauptstrom überlagerte störende Wechselstrom in der Grössenordnung von 1 Prozent der Gesamtstromstärke, und die Wechselspannungskomponente beträgt sogar nur 0,25 Prozent der Gesamtspannung U. Die unerwünschte Beeinflussung des Hauptstromkreises bleibt in solchen Schranken, dass sich hier eine Korrektur der Sondencharakteristik erübrigt.

§ 3. Die Frequenzabhängigkeit.

Oberhalb einer gewissen kritischen Frequenz weichen die dynamischen Sondencharakteristiken von der statischen (I_S, U_S)-Kurve ab. Die Ursache kann dabei in einer Rückwirkung der Oszillographen-Apparatur auf den Messkreis, d. h. in einem Messfehler liegen; es kann sich aber auch um eine reelle Frequenzabhängigkeit der dynamischen Charakteristik handeln, die in den

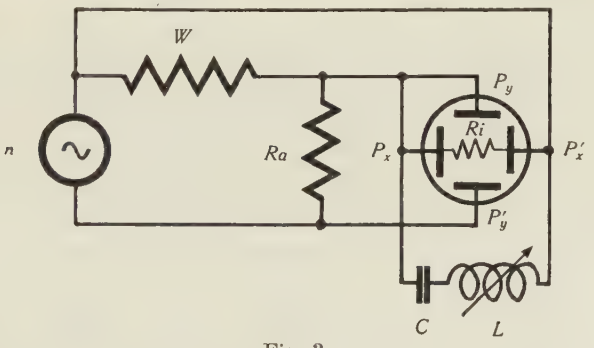


Fig. 3.
Schema zur Erläuterung der Rückwirkung der Osz.-Röhre.

Vorgängen, welche sich in der Bogenentladung abspielen, begründet liegt.

a) *Rückwirkung der Oszillographenröhre und Gegenmassnahmen.* Besonders bei hohen Messfrequenzen kann eine Störung auftreten, weil der Widerstand Ri zwischen den Ablenkplatten der Oszillographenröhre nicht unendlich gross ist. An einem einfachen Beispiel soll gezeigt werden, wie diese Auswirkung zustande kommt. Wenn z. B. mit Hilfe einer Braun'schen Röhre die Charakteristik eines Ohm'schen Widerstandes W (siehe Fig. 3) aufgenommen werden soll, so wird man ihn zweckmässig nach der angegebenen Schaltung mit dem Oszillographen verbinden. Die Enden von W

stehen mit den Platten P_x, P_x' in Verbindung, während über dem Widerstand Ra ein dem Strom proportionaler Spannungsabfall den Ablenkplatten P_y, P_y' zugeführt wird. Falls der Widerstand W unendlich gross ist, so sollte der Fluoreszenzfleck des Oszillographen eine Gerade mit der Neigung O, d. h. die Abszisse beschreiben. Weil aber zu W parallel der Innenwiderstand Ri des Oszillographen und zudem die gegenseitige Kapazität der Verbindungsleitungen liegt, so wird das nicht der Fall sein, solange Ri und der Wechselstromwiderstand der Schaltkapazität verglichen mit dem Widerstand Ra nicht gross sind. In Fig. 4b sind Charakteristiken dargestellt, die bei einer Frequenz 5200 Hertz für verschiedene Widerstandswerte W aufgenommen worden sind. Infolge der störenden Auswirkung von Ri und der Schalt-

Fig. 4a.

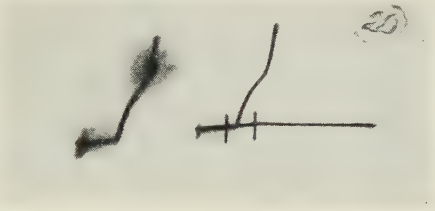
Fig. 4b.

Charakteristiken Ohm'scher Widerstände. Frequenz $n = 5200$ Hertz.
a. Rückwirkung korrigiert b. unkorrigiert.
$W = 0$, 2000, 4000, 8000 Ohm bzw. ∞.

kapazität zeigen diese Charakteristiken Schleifenform. Wie sich herausgestellt hat, kann diese Störung praktisch beseitigt werden, wenn über P_x, P_x' unter Zwischenschaltung eines Kondensators (letzterer hat die Aufgabe Gleichstrom abzuriegeln) eine variable Selbstinduktion L geschaltet wird. Diese Selbstinduktion bildet zusammen mit der störenden Schaltkapazität und der Kapazität des Ablenkplattenpaares einen Schwingkreis, der auf die Messfrequenz n abzustimmen ist. Die Wirksamkeit der Korrektur geht aus Fig. 4a deutlich hervor. Bei Durchführung der Messungen konnte fast durchwegs auf diese Massnahme verzichtet werden, da in der Regel mit kleinem Ra und mit der Frequenz 50 Hertz gearbeitet wurde; nützlich war die Massnahme bei der Untersuchung des Frequenzeffekts.

b) *Reelle Frequenzabhängigkeit.* Bei hinreichend niederer Frequenz müssen statische und dynamische Charakteristik denselben Verlauf zeigen, dagegen werden sich bei höhern Frequenzen Abweichungen bemerkbar machen. Es sollen im folgenden die auffälligsten Verformungen der dynamischen Sondencharakteristik besprochen werden.

Elektronenstromteil (vgl. § 1). Beim Wolfram-Stickstoffbogen stimmt die dynamische Sondencharakteristik für die Frequenz $n = 50$ Hertz vollkommen mit der statischen überein (eine Ausnahme für den Fall, dass die Sonde sehr weit ausserhalb der Bogenaxe liegt, wird nachher besprochen). Das wird auf die folgende Weise festgestellt: Zunächst wird die Charakteristik bei der Frequenz 50 Hertz auf dem Fluoreszenzschirm entworfen und photographiert (Fig. 5a Charakteristik II). Nachher wird der Transformator T (vgl. Schaltschema Fig. 2) primär abgeschaltet, und es werden der Sonde nacheinander verschiedene Potentiale aufgeprägt,



I II

Fig. 5a.

I II III

Fig. 5b.

Fig. 5. a, b mittelst Braun'scher Röhre aufgenommene Sondencharakteristiken. *Wolfram-Stickstoffbogen.* (Druck $p = 125$ mm Hg).

Fig. 5a. I: 0 und 50 Hertz übereinander
II: 50 Hertz allein
} Abstand Sonde-Kathode 3 mm.

Fig. 5b. I: $n =$ 50 Hertz
II: $n = 1500$ Hertz
III: $n = 1500$ Hertz u. $C = 2000$ cm über Ra
} Abstand Sonde Kathode 1,5 mm. Sonde 1 mm aus Axe verschoben.

indem über die Batterie B_1 ein Potentiometer geschaltet wird, auf welchem verschiedene Spannungen abgegriffen werden. Stimmen statische und dynamische Sondencharakteristiken überein, so kommt der Fluoreszenzfleck der Braun'schen Röhre nur in Punkte zu liegen, welche auch überstrichen werden, wenn an der Sonde die Wechselspannung liegt. Bei Aufnahme der Kurve I in Fig. 5a ist zweimal exponiert worden. Während zunächst bei der Frequenz 50 nochmals die dynamische Charakteristik festgehalten worden ist,

sind dann nachträglich der Sonde durch Verschieben des Potentiometer-Kontaktes verschiedene Spannungen erteilt worden. In der Aufnahme I in Fig. 5a sind die Abbildungen des ruhenden Fluoreszenzflecks deutlich erkennbar. Sie fallen aber genau mit dem Bild der dynamisch erhaltenen Charakteristik zusammen. Ein Beweis dafür, dass die unter Verwendung einer Wechselspannung dynamisch aufgenommene Charakteristik tatsächlich mit der punktweise ermittelten (I_S, U_S)-Kurve übereinstimmt.

α) *Frequenzeffekt 1.* Bei Frequenzen über 500 Hertz bildet sich im Kurventeil, welcher zwischen den beiden steil ansteigenden

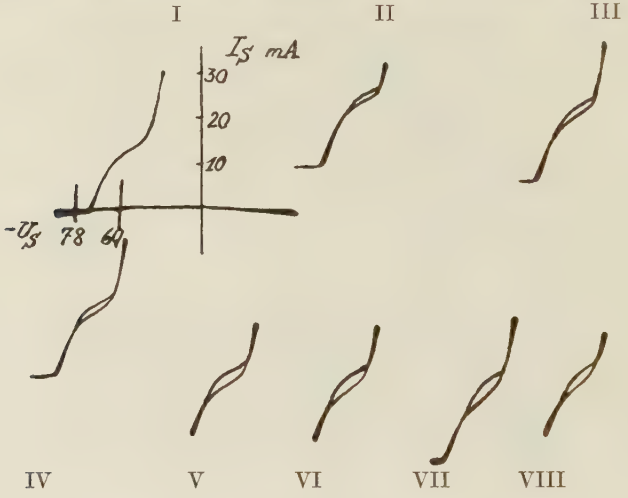


Fig. 6.

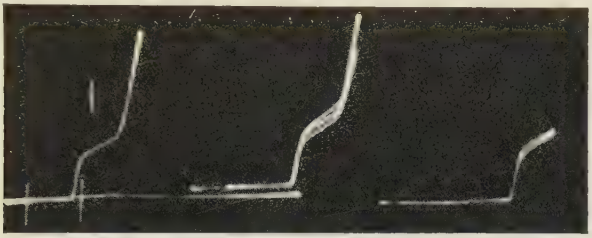
Abhängigkeit der Schleifenbreite von der Frequenz.

Druck $p = 107$ mm Hg, Bogenlänge $l = 6$ mm, Abstand Sonde-Kathode $\Delta l^- = 1$ mm seitliche Verschiebung der Sonde $d = 2{,}5$ mm, Sondentemperatur $T = 1720°$ K.

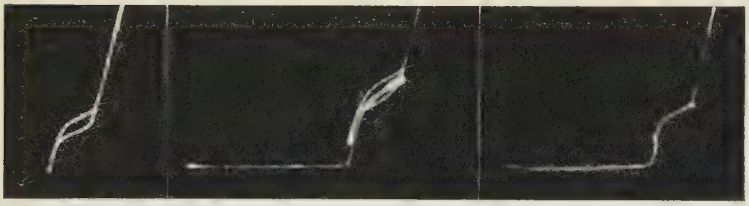
Charakteristik	I: Frequenz	$n =$ 50 Hz
	II:	$n =$ 300 Hz
	III:	$n =$ 2000 Hz
	IV:	$n =$ 2700 Hz
	V:	$n =$ 3500 Hz
	VI:	$n =$ 4500 Hz
	VII:	$n =$ 6000 Hz
	VIII:	$n =$ 10000 Hz

Ästen der Charakteristik liegt, eine hysteresisartige Schleife aus (vgl. Fig. 5b, II); dieser Effekt sei im folgenden zur Unterscheidung von andern Erscheinungen als Frequenzeffekt 1 bezeichnet. Zur Bestimmung des Umlaufsinns wird eine Kapazität $C = 2000$ cm über Sonde und Anode angeschaltet und festgestellt, dass sich dadurch die Schleife verbreitert; andererseits kommt die Schleife

eben zum Verschwinden, falls derselbe Kondensator über *Ra* angeschlossen wird. Daraus geht hervor, dass die Schleife im Uhrzeigersinn umlaufen wird (vgl. Pfeile). Im Gebiet dieser Schleife sind einem Sondenpotentialwert U_S zwei Stromwerte I_{S1}, I_{S2} zugeordnet. Bezeichnet man die grösste an einer gegebenen Charakteristik gemessene Differenz $|I_{S1}-I_{S2}|$ als „Schleifenbreite", so lässt sich feststellen, dass diese für eine bestimmte Frequenz einen Maximalwert erreicht. Diese maximale Breite liegt in den



I II III



IV V VI

Fig. 7.

Abhängigkeit der Form der Sondencharakteristik von der Ruhespannung. $p = 125$ mm Hg, $l = 5$ mm, $\Delta l^- = 1{,}5$ mm, $d = 1$ mm (Bezeichnungen vgl. Fig. 6).
Charakteristik I: $n =$ 50 Hz (Eichmarken $U_S = -80$, -60 V geg. Anode)
II: $n =$ 50 Hz und $n = 1500$ Hz
III: $n = 1500$ Hz, Ruhespannung $U_{S_0} = -78$ V
IV: $n = 1500$ Hz, $U_{S_0} = 0$ V
V: $n = 1500$ Hz, $U_{S_0} = 0$ und -78 V
VI: $n =$ 50 Hz, $U_{S_0} = 0$ und -78 V.

von mir untersuchten Fällen im Gebiet 2000 – 4000 Hertz. Ein Beispiel für den Verlauf dieser Frequenzabhängigkeit geben die Aufnahmen Fig. 6. Die maximale Schleifenbreite ist im Falle der Kurve V erreicht; es ist dort $|I_{S1}-I_{S2}| = 2{,}8$ mA. Bemerkenswert ist auch folgende Tatsache: Die Schleife der dynamischen Charakteristik umschliesst die statische (I_S, U_S)-Kurve symmetrisch, und es ergibt sich sonst keine Verschiebung (Fig. 7, I, II).

Die Form der dynamischen Sondencharakteristik ist auch abhängig von der Amplitude der Wechselspannung und von der

Grösse der Ruhespannung, welche der Sonde erteilt wird. Ist die Sonde vorwiegend negativer als das Raumpotential, so verschwindet die Schleife fast vollständig (Fig. 7, III), dagegen ist die Aufspaltung bei derselben Frequenz sehr deutlich, falls die Sonde während eines grossen Teils der Schwingungsdauer der Wechselspannung positiver als das Raumpotential ist (Aufnahme IV). Bei V sind Fall III und IV übereinander photographiert und VI stellt eine Kontrollaufnahme mit der Frequenz 50 Hz dar; obgleich Kurve VI in zwei Stücken aufgenommen worden ist, deckt sich der Verlauf mit Charakteristik I.

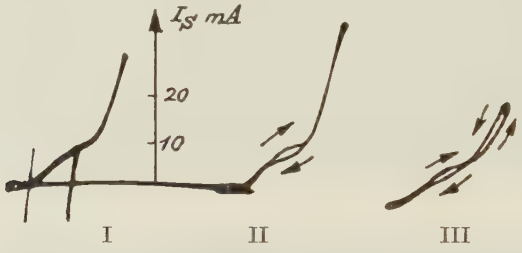


Fig. 8a.
„Frequenzeffekt 2".
$p = 107$ mm Hg, $l = 6$ mm, $I = 0{,}33$ A, $\Delta l^{-} = 4{,}5$ mm, $d = 2{,}5$ mm.
Charakteristik I: $n =$ 50 Hz, (Eichmarken $U_S = -72$, -54 V geg. Anode)
II: $n =$ 800 Hz
III: $n = 10000$ Hz.

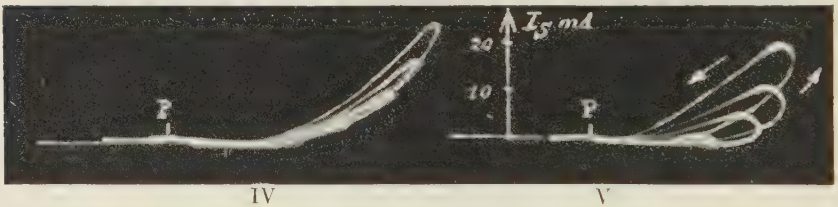


Fig. 8b.
„Frequenzeffekt 2'".
$p = 128$ mm Hg, $l = 5$ mm, $I = 0{,}31$ A, $\Delta l^{-} = 3$ mm, $d = 5$ mm.
Charakteristiken IV: $n = 50$ Hz, Ruhespannung $U_{S_0} = -60$, -36, 0, beziehungsweise $+$ 18 V geg. Anode.
Charakteristiken V: $n = 1500$ Hz, Ruhespannungen U_{S_0} wie oben.

β) Frequenzeffekt 2. Eine weitere Komplikation tritt hinzu, falls die Frequenz n sehr hoch gewählt wird, oder wenn die Sonde sehr weit seitlich aus der Bogenaxe herausgedreht wird, d. h. bei grossem d. Fig. 8a zeigt drei für verschiedene Frequenzen n unter sonst gleichen Vorbedingungen registrierte Charakteristiken. Bei $n = 10000$ Hertz (Kurve III) tritt eine Überschneidung und Zweiteilung der Schleife ein. Dabei entspricht die untere Hälfte

der bis jetzt betrachteten Schleifenform („Frequenzeffekt 1"), und es wird im Gegensatz dazu der obere Teil entgegen dem Uhrzeigersinn umlaufen (vgl. Pfeile); diese neue Schleifenbildung möge als „Frequenzeffekt 2" gekennzeichnet werden. Die Zweiteilung verschwindet, wenn sich die Sonde genau in der Bogenaxe befindet. Eine entsprechende Erscheinung tritt sogar bei sehr tiefen Frequenzen auf (z. B. bei $n = 50$ Hertz), sobald die Sonde weit genug aus der Bogenaxe entfernt ist. Im Falle der Aufnahme der Fig. 8b ist der Bereich, in welchem die Schleife, die im Uhrzeigersinn durchlaufen wird, zu suchen wäre, mit P bezeichnet. Wegen der exzentrischen Lage der Sonde nimmt letztere in jenem Bereich überhaupt fast keinen Strom auf, und der Frequenzeffekt 1 bleibt unsichtbar. Erst wenn die Sonde gegen das Raumpotential stark positiv wird, bilden sich im Gegenuhrzeigersinn umlaufene Schleifen aus. Ihre Breite nimmt mit zunehmender Frequenz und bei Verkleinerung der, gegen die Anode gemessenen negativen Ruhespannung zu. Diese Schleifenbildung, die zweifellos mit dem „Frequenzeffekt 2" zusammenhängt, soll als „Frequenzeffekt 2'" bezeichnet werden.

Ionenstromteil. γ) Frequenzeffekt 3. Ist das Potential der Sonde bedeutend negativer als das Raumpotential, so fliesst auf die Sonde ein Ionenstrom. Um dynamische Ionenstrom-Sonden charakteristiken aufzunehmen, muss der Sonde eine ausreichend grosse negative Ruhespannung (auf die Anode bezogen) erteilt werden. Ferner ist der Widerstand *Ra* (Fig. 2) grösser zu bemessen, entsprechend dem im Verhältnis zum Elektronenstrom kleinen Ionenstrom. Bei Verwendung der Frequenz 50 Hertz soll, falls die Rückwirkung des Oszillographen nicht korrigiert wird, für *Ra* kein höherer Wert als 50000 Ohm verwendet werden. Es lässt sich dann in der Charakteristik, bei Verwendung einer Oszillographen-Anodenspannung von 1000 Volt, eine Stromdifferenz von 0,05 mA eben noch erkennen. Zwischen dynamisch und statisch gemessenen Ionenstrom-Charakteristiken zeigt sich ein Unterschied. Es verläuft z. B. die mit der Frequenz 50 Hertz gemessene Charakteristik flacher als die statische Kurve und schneidet letztere im Wert der Sondenruhespannung U_{S_0}. Zwei bei verschiedener Ruhespannung aufgenommene Teile der Ionenstrom-Charakteristik verlaufen darum nicht ineinander (Fig. 9a, b), eine Erscheinung, die als „Frequenzeffekt 3" bezeichnet werden soll.

Diskussion. Im folgenden sollen die drei beobachteten Abweichungen, die zwischen einer punktweise, statisch gemessenen Sondencharakteristik und einer dynamischen (I_S, U_S)-Kurve auf-

treten können, diskutiert werden. - Bei der statischen Messung wartet man bei jedem Wert U_S mindestens eine „kritische Zeit" t_k, d. h. solange, bis sich bezüglich der Sonden- und Gastemperatur, sowie in bezug auf die Raumladungsverteilung ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Im Gegensatz dazu wird bei Aufnahme der dynamischen Charakteristik dieser Gleichgewichtszustand nicht abgewartet, so dass einem gegebenen Potentialwert U_S, je nachdem ob statisch oder dynamisch gemessen wird, verschieden grosse Ströme I_S zugeordnet sein können.

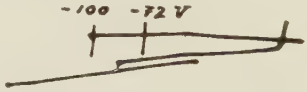


Fig. 9a.
„Frequenzeffekt 3".
$p = 125$ mm Hg, $l = 5$ mm, $I = 3{,}1$ A, $\Delta l^{-} = 1$ mm
Ruhespannung $U_{S_0} = -32$ und -92 V.

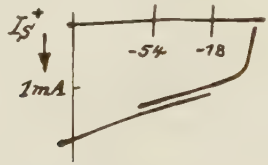


Fig. 9b.
„Frequenzeffekt 3".
$p = 55$ mm Hg, $l = 5$ mm, $I = 3{,}1$ A, $\Delta l^{-} = 2$ mm
Ruhespannung $U_{S_0} = -12$ und -60 V
in beiden Fällen $n = 50$ Hz und $Ra = 45\,000$ Ohm.

Ein auffälliger Hinweis darauf, dass ein elektrisches System der Trägheit unterworfen ist, stellt das Auftreten hysteresisartiger Schleifen in der dynamischen Charakteristik dar. Solche Schleifen treten dann in Erscheinung, wenn die Schwingungsdauer $1/n$ (n = Frequenz) der Wechselspannung, mittelst welcher die dynamische Charakteristik gemessen wird, mit der kritischen Zeit t_k (vgl. oben) vergleichbar ist. — Die Schleifenbreite erreicht bei einer „kritischen Frequenz" ein Maximum. Ferner ergeben sich folgende zwei Grenzfälle: 1. Die Schwingungsdauer $1/n$ ist sehr gross, verglichen mit der kritischen Zeit t_k, dann verschwindet die Schleife, d. h. sie fällt in die statische Charakteristik. 2. Es ist $1/n$ klein verglichen mit t_k; in diesem Falle geht die Schleifenbreite ebenfalls gegen Null. Das entsprechende Stück der dynamischen Charakteristik erscheint aber gegenüber der statischen Charakteristik verschoben.

M. Wehrli und V. Hardung[1]) haben gefunden, dass in der im Hauptstromkreis des W-N_2-Bogens gemessenen dynamischen Charakteristik (infolge der Temperaturträgheit der Elektroden) schon bei sehr niedern Frequenzen Schleifen auftreten müssen. Als kritische Frequenzen sind dabei durchwegs Werte unterhalb 50 Hertz ermittelt worden. — Ein ähnlicher thermischer Effekt ist auch bei der Aufnahme einer dynamischen Sondencharakteristik zu erwarten; hängt doch der Sondenstrom von der Gastemperatur, die ihrerseits von der Temperatur der Sonde beeinflusst wird, ab. Durch diese erwartete Temperaturträgheit der Sonde wird der „Frequenzeffekt 3" verursacht. Im Beispiel der Fig. 9 liegt die Frequenz 50 Hertz schon so beträchtlich über der kritischen Frequenz, dass die Schleifenbreite wieder auf Null zurückgegangen ist. Hierbei ist die Schwingungsdauer im Vergleich zur Zeitspanne, die zur Herstellung des Temperatur-Gleichgewichts erforderlich ist, schon so klein, dass die Sondentemperatur den Schwankungen des Sondenstroms nicht mehr zu folgen vermag und einen konstanten Mittelwert einnimmt. In Fig. 9a z. B. sind zwei Teile einer Ionenstrom-Charakteristik aufgenommen, bei denen der Sonde neben der konstanten Wechselspannungs-Amplitude nacheinander zwei verschiedene Ruhespannungen erteilt worden sind. Trotz der wechselnden Stromstärke ist die Sondentemperatur in beiden Fällen über die gesamte Schwingungsdauer konstant. Die Sonde ist aber bei der kleinern negativen Ruhespannung (Potential auf die Anode bezogen) entsprechend dem kleinern Mittelwert des aufgefangenen Ionenstroms weniger heiss, als beim grössern Wert U_{S_0}. Daraus, dass eine heissere Sonde mehr Strom aufnimmt (weil sie auch die Gastemperatur vergrössert) als eine solche mit geringerer Temperatur, erklärt sich die beobachtete Verschiebung: Derjenige Teil der Charakteristik, welcher mit der grössern negativen Ruhespannung aufgenommen worden ist, kommt in der Zone überlappender Potentialwerte tiefer zu liegen (grössere Ionenströme!) als der dem Abszissenschnittpunkt näher gelegene Kurventeil (vgl. Fig. 9a, b).

Bei „Frequenzeffekt 1" handelt es sich um das Auftreten einer hysteresisartigen Schleife oberhalb des „Knies" der Sondencharakteristik. Nach Fig. 6 liegt die maximale Schleifenbreite im Frequenzgebiet 3500 Hertz. — Dieser Effekt kann wohl nicht mit der Temperaturträgheit der Sonde erklärt werden, denn es ist nicht anzunehmen, dass die Sondentemperatur in Bruchteilen

[1]) M. Wehrli und V. Hardung, Helv. Phys. Acta **2**, 125, 1929, siehe auch: P. Bächtiger, Helv. Phys. Acta **3**, 335, 1930.

einer tausendstel Sekunde noch merklich schwanken kann. Falls diese Schleife aber doch durch solche Temperaturschwankungen verursacht würde, so müssten Form und Ausmasse der Sonde die Frequenzabhängigkeit der Charakteristik wesentlich beeinflussen; ist doch die Temperaturträgheit eines Systems in erheblichem Masse von dessen Wärmekapazität und Wärme-Ableitungsvermögen abhängig. Die Tatsache, dass sich dieselbe kritische Frequenz ergibt, gleichgültig ob mit einer 0,2 mm dicken „Stabsonde" oder mit einer Kugelsonde (Kugeldurchmesser 2 mm, Stieldurchmesser 0,4 mm) gemessen wird, beweist, dass hier Temperaturschwankungen der Sonde nicht mitspielen können. — Schliesslich ist zur Erklärung dieser Schleifenbildung auch noch die Temperaturträgheit der die Sonde umgebenden Gasschicht in Erwägung gezogen worden. Da aber unter diesen Voraussetzungen der in Fig. 5b angedeutete Umlaufsinn der Schleifen (Uhrzeiger-Sinn) nicht erklärt werden kann, ist auch ein solcher thermischer Effekt nicht verantwortlich zu machen.

Frequenzeffekt 1 lässt sich vielmehr folgendermassen deuten: Wenn das Sondenpotential so um einen Mittelwert oszilliert, dass periodisch die Punkte $A-D$ der Charakteristik durchlaufen werden (vgl. Fig. 1), so beginnt sich jeweilen rechts von Punkt B an der Sonde ein Anodenfall auszubilden, d. h. es baut sich um die Sonde mit endlicher Geschwindigkeit eine negative Raumladung auf. Infolge der Trägheit, mit der sich dieser Aufbau vollzieht, ist die Raumladung bei demselben Potentialwert U_s kleiner oder grösser, je nachdem ob sich die positive Vorspannung der Sonde (auf das Raumpotential bezogen) vergrössert oder verringert. Da die negative Raumladung die Elektronen abstösst, entspricht im Elektronenstromteil der Charakteristik einer intensiven negativen Raumladung ein kleiner Sondenstrom (Fall abnehmenden positiven Potentials), und umgekehrt müssen sich bei geringer Raumladung (wenn der Anodenfall fast ganz verschwunden ist) grössere Sondenstromwerte einstellen.

Auch bei „Frequenzeffekt 2" handelt es sich um hysteresisartige Schleifen, die nur beobachtet werden, wenn sich die Sonde ausserhalb der Bogenaxe befindet. Ihr Umlaufsinn ist, verglichen mit demjenigen bei Frequenzeffekt 1, entgegengesetzt (Gegenuhrzeigersinn). Solche Schleifen können z. B. gleichzeitig mit denjenigen von Frequenzeffekt 1 auftreten (vgl. Fig. 8a III), oder aber besonders deutlich allein vorhanden sein, falls sich die Sonde weit ausserhalb der Bogenaxe befindet (vgl. Fig. 8b). Hier liegt eine ausgesprochene Gitterwirkung vor, indem jeweilen die positive Sonde die Hauptentladung von der eigentlichen Anode wegleitet.

Es ist jetzt die Elektronenstromdichte entsprechend dem Sondenpotential eine periodische Funktion. Da aber die Entladung der ablenkenden Wirkung der Sonde nur mit einer gewissen Trägheit folgt, eilt die Elektronenstromdichte den Sondenpotentialen um eine kleine Phasenverschiebung nach. Daraus ergibt sich eine Schleifenbildung mit dem in Fig. 8b angedeuteten Umlaufsinn.

§ 4. Messung von Sondencharakteristiken im offenen Kohlebogen.

W. B. Nottingham[1]) verwendet für Sondenmessungen im Kohlebogen Wolframsonden, die er rasch durch die Säule bewegt. Er erteilt der Sonde nacheinander verschiedene Potentiale und misst jeweilen die beim Durchschwenken ballistisch erzielten Galvanometer-Ausschläge Bei ruhender Sonde führt er keine Messungen durch, weil sich die Sonde zu stark erhitzt und als Kathode oder Anode zündet. Auch J. Leland Myer[2]) schwenkt die Sonde durch den Bogen, während er mittelst Oszillographenröhre bei Verwendung der Frequenz 50 Hertz dynamische Sondencharakteristiken auf dem Fluoreszenzschirm entwirft. Dabei wird nur visuell beobachtet, was genügt, um die Raumpotentiale (U_{Knie}-Potentiale) zu bestimmen.

Wie sich herausgestellt hat, lässt sich unter Verwendung von Kohlesonden und bei geeignet gewählten Betriebsdaten auch mit ruhender Sonde zuverlässig messen. Grundbedingung ist, dass die Messdauer, verglichen mit der Zeitspanne, in welcher sich die Sonde infolge Abbrennens merklich deformiert, klein bleibt. Man erhält dann also nicht nur die Kurvenform, sondern es kann auch der dem Raumpotential zugeordnete Sondenstrom quantitativ richtig gemessen werden. Das ermöglicht aber die Bestimmung der Absolutwerte der Elektronenstromdichte. Bei Verwendung einer Oszillographen-Anodenspannung von 2000 Volt und einer Frequenz von 50 Hertz macht es keine Schwierigkeit, eine Charakteristik mit einer Expositionszeit von 0,1 Sekunden zu photographieren. Der Forderung nach möglichst kurzer Messdauer wird damit Genüge geleistet. — Die Hauptelektroden sind vertikal angeordnet und werden von einem universell verstellbaren Bogenstativ gehalten. Die Sonde ist an einem separaten Stativ befestigt und kann durch Mikrometer-Schrauben sowohl in der Höhe als auch in Richtung der Sondenaxe nachgestellt werden. Entsprechend den grossen Betriebstromstärken wachsen auch die Sondenströme an, so dass bei diesen Messungen der Widerstand *Ra*

[1]) W. B. Nottingham, Journ. of the Franklin Inst. **206**, 43, 1928.
[2]) J. Leland Myer, ZS. f. Phys. **87**, 1, 1934.

(Fig. 2) kleiner gewählt wird. Bei Messungen im Elektronenstromteil der Charakteristik beträgt der Widerstandswert 80 Ohm und im Falle der Aufnahme des Ionenstromteils 9000 Ohm.

Die Sondencharakteristiken des Kohlebogens (Homogen- und Dochtkohle-Elektroden) zeigen qualitativ denselben Verlauf wie diejenigen des Wolfram-Stickstoffbogens[1]). Es tritt hier schon gelegentlich bei der Frequenz 50 Hertz oberhalb des Raumpotentials die im Uhrzeigersinn umlaufene hysteresisartige Schleife auf

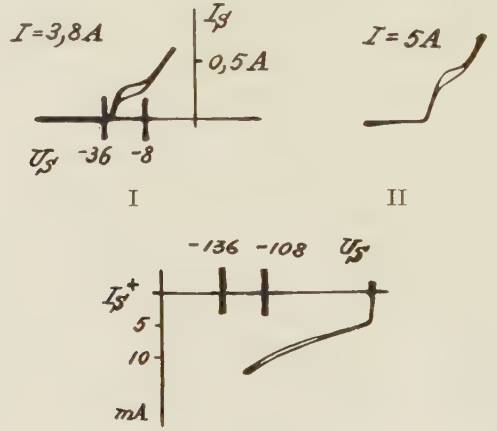


Fig. 10.
Sondencharakteristiken eines Homogen-Kohlebogens.
Offener Kohlebogen, Bogenlänge $l = 15$ mm, Anode oben, Homogenkohlen
Abstand Sonde-Kathode $\Delta l^- = 12$ mm, 1,6 mm Kohlesonde.

(vgl. Fig. 10, I, II). Bei Homogenkohlen lässt sich im Maximum bis zu einer Stromstärke von 5 Ampere vordringen; oberhalb dieses Wertes zündet die Sonde entweder als Anode oder Kathode. — Nach Langmuir ist die dem Raumpotential zugeordnete Sondenstromstärke der ungeordneten Stromdichte am Orte der Sonde proportional. Näherungsweise wird die von der Entladung bedeckte Sondenoberfläche ermittelt und im Falle der Charakteristik II bei einer Betriebstromstärke von 5 Ampere die Elektronenstromdichte in 12 mm Entfernung von der Kathode zu 2 Ampere/cm^2 gefunden. Entsprechend wird im Falle der Ionenstromcharakteristik III durch Extrapolation die Stärke des Ionenstroms im Raumpotential festgestellt, woraus sich eine Ionenstromdichte von 0,02 Ampere/cm^2 ergibt.

[1]) Zum selben Resultat ist schon Nottingham (l. c.) mit Hilfe seines Messverfahrens gekommen.

Potentialverlauf im Kohlebogen. In zwei Fällen werden längs der Bogenaxe in sechs Punkten die Sondencharakteristiken aufgenommen und nachträglich die Raumpotentiale in Funktion des Abstandes Sonde-Kathode Δl^- aufgezeichnet. Eine Reproduktion dieser Charakteristiken findet sich in Fig. 11, ferner ent-

Verlauf der Charakteristiken in verschiedenen Punkten der Bogenaxe.

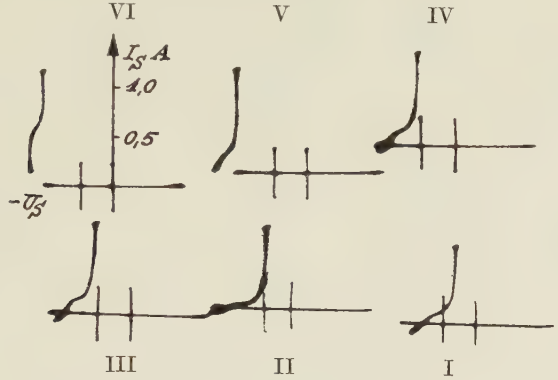


Fig. 11a.
Homogenkohle-Bogen.

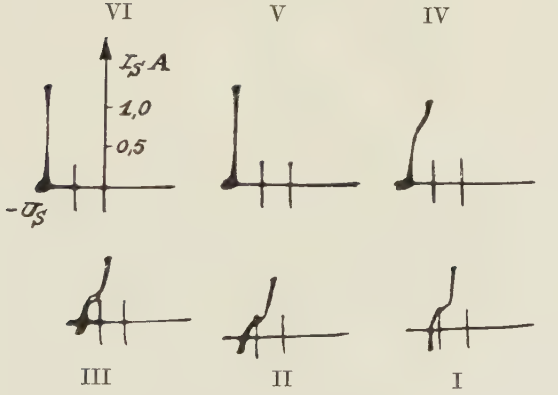


Fig. 11b.
Dochtkohle-Bogen.
Bogenlänge $l = 10$ mm, Anode oben, $I = 3{,}9$ A, Eichmarken $U_S = 0$ und -18 V.

hält Tabelle II eine Zusammenstellung der ermittelten Potentialwerte. Im Falle von Fig. 11a werden Siemens-Homogenkohlen von 12,5 mm Durchmesser verwendet, während die Charakteristiken in Fig. 11b für einen Bogen mit Dochtkohlen gelten (Kohlen Conradty „Kinomarke Noris", 13,5 mm Durchmesser). Als Sonden dienen Kohlestäbchen von 1,6 mm Durchmesser,

die sich vorne (durch das Abbrennen) kegelförmig verjüngen. Die Messungen werden jeweilen erst durchgeführt, nachdem der Bogen während etwa fünf Minuten eingebrannt ist. — Fig. 12 zeigt den ermittelten Potentialverlauf. Es sei speziell erwähnt, dass auch bei dieser Messung im Falle der Dochtkohlen zwei

Tabelle II.

Potential-Verlauf im Kohlebogen.

Charakt. No.	Δl	U_{Knie} geg. Anode	Gesamtsp. U	U_{Knie} geg. Kathode
		Homogenkohle-Bogen.		
I	9,5 mm	38 V	92 V	54 V
II	8,5	45	92	47
III	6,8	48,5	88	39,5
IV	5,0	54,5	87	32,5
V	3,0	70	90	20
VI	1,5	72	88	16
		Dochtkohle-Bogen.		
I	9,5 mm	29 V	67 V	38 V
II	8,5	31,5	66	34,5
III	6,8	37	65	28
IV	5,0	41	65	24
V	3,25	(46)	65	19
VI	1,5	(50)	65	15

Gebiete mit verschieden grossem Spannungs-Gradienten festgestellt werden, wie das A. Hagenbach und M. Wehrli[1]) schon früher beschrieben haben. Die maximal beobachtete Abweichung zwischen dem Potentialwert U_{Knie} (Raumpotential) und dem statischen Sondenpotential beträgt 5 Volt. Sie tritt dann auf, wenn sich die Sonde in Anodennähe befindet.

Beeinflussung der Sondencharakteristik durch Verdampfen von konzentrierten Salzlösungen. Erteilt man der Sonde z. B. gegen Anode ein immer kleineres negatives Potential, so wird die Sondencharakteristik (vgl. Fig. 1) in der Richtung $A-D$ durchlaufen. Es treffen vorerst im Gebiet $A-B$ Elektronen auf, welche primär eine Geschwindigkeit besitzen, während in der Zone $B-C$ die Sonde auf alle Elektronen bereits beschleunigend wirkt. Der starke Anstieg nach Punkt C lässt vermuten, dass dort schon das erste Ionisationspotential $V_i\ I$ des Bogengases überschritten worden

[1]) A. Hagenbach und M. Wehrli, Zeitschr. f. Phys. **26**, 23, 1924.

ist, so dass also das Raumpotential ungefähr um den Betrag von $V_i\ I$ links von Punkt C liegen müsste. — Durch einen einfachen Versuch soll geprüft werden, wieweit experimentell ein Zusammenhang zwischen der Grösse $|B'-C'| = \Delta V$ (siehe Fig. 1) und dem ersten Ionisationspotential des Bogengases nachzuweisen ist. — Es

Fig. 12.
Potentialverlauf im Kohlebogen.
l = 10 mm, I = 3,9 A.

werden zu diesem Zwecke die Sondencharakteristiken, die sich im normalen Homogenkohlebogen ergeben, mit denjenigen verglichen, die photographisch registriert werden, kurz nachdem man in derselben Bogenentladung konzentrierte Salzlösungen zum Verdampfen gebracht hat. Zunächst werden die Homogenkohlen gut eingebrannt und dann mehrmals hintereinander bis zur vollständigen Abküh-

lung in die entsprechende konzentrierte Salzlösung eingetaucht. Nach erneutem Zünden wird äusserst rasch die Stromstärke einreguliert, die Kohlesonde eingeführt und die Sondencharakteristik in 0,1 Sekunden ab dem Fluoreszenzschirm des Oszillographen photographisch registriert. Ein während mehreren Sekunden stabiler Bogen ist auf diese Weise bei Behandlung der Kohle-

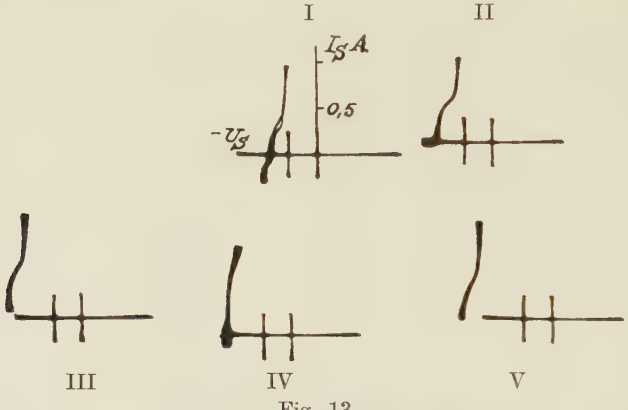


Fig. 13.
Beeinflussung des Wertes ΔV durch Verdampfen konzentrierter Salzlösungen. Bogenlänge $l = 11$ mm, Anode oben, Abstand Sonde-Kathode $\Delta l^- = 2{,}8$ mm Eichmarken $U_S = 0$ und -27 V.

Tabelle III.

Charakteristik	Elektroden behandelt mit	Gesamt-Stromst. I	Δ V
I	$CuCl_2$	3,5 A	8,5±1,0 V
II	$CdCl_2$	3,5	12,5
III	Elektr. rein	3,5	15,5
IV	NaCl	2,5	6,5
V	ZnJ_2	3,5	13,0

elektroden mit den Chloriden von Na, Cu, Cd sowie mit ZnJ_2 erhalten worden. Nach diesem Verfahren aufgenommene Charakteristiken sind in stark verkleinerter Form in Fig. 13 wiedergegeben. Eine Beeinflussung des Wertes ΔV ist unverkennbar; die zu Fig. 13 gehörende Tabelle III orientiert über die aus den Originalaufnahmen ermittelten Werte.

Zur Erklärung dieses Effektes sind zwei Möglichkeiten in Erwägung zu ziehen:

a) Angenommen das Raumpotential liege in Punkt C der Charakteristik, dann könnte das Abbiegen der (I_S, U_S)-Kurve

links von Punkt B damit erklärt werden, dass dort die Sonde schon merklich Elektronen emittiert, also gewissermassen als Kathode wirkt. Dieser Vorgang könnte sich je nach Grösse der Elektronenaustritts-Arbeit mehr oder weniger weit von Punkt C entfernt einstellen. Nun kann aber beim Wolfram-Stickstoffbogen gezeigt werden, dass eine solche Erklärung unhaltbar ist. Erstens ist die Temperatur der Sonde zu gering, um überhaupt eine Elektronenemission zu ergeben, die mit dem Sondenstrom vergleichbar ist. Zweitens wird bei Messungen längs der Bogenaxe festgestellt,

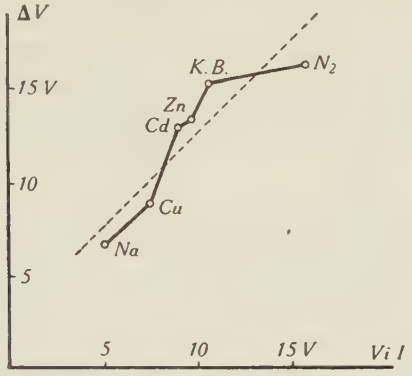


Fig. 14.

Vergleich der ermittelten ΔV-Werte mit den entsprechenden Ionisationspotentialen.

dass die Sondentemperatur je nach der Lage der Sonde bis gegen 1000 Grad schwankt, während sich praktisch dasselbe ΔV ergibt. Die Sonde kann also unmöglich als Kathode wirken, sonst müsste sich der Verlauf der (I_S, U_S)-Kurve (speziell der Wert ΔV) bei Temperaturschwankungen wesentlich ändern.

b) Erfolgreich ist es dagegen, die Veränderung des Ionisationspotentials des Bogengases für die Verformung der Sondencharakteristik verantwortlich zu machen. In Fig. 14 werden darum die ΔV-Werte mit den Ionisationspotentialen der in den entsprechenden Fällen zugeführten Metallatomen verglichen. Punkt $K.\ B.$ entspricht dem ΔV-Wert für den normalen Homogenkohlebogen. Das erste Ionisationspotential des Bogengases wurde in diesem Falle gemäss der Arbeit von Mannkopf[1]) zu 10,4 Volt angenommen. In diese graphische Darstellung ist auch der ΔV-Wert für den Wolfram-Stickstoffbogen aufgenommen worden. Er wurde im Mittel zu 15,9 Volt gefunden, während das Ionisations-

[1]) R. Mannkopf, ZS. f. Phys. **86**, 163, 1933.

potential $V_i I$ für das Stickstoff-Molekül 15,8 Volt beträgt. Wie ersichtlich, streuen die durch Kurvenzug verbundenen Punkte um eine unter dem Winkel 45 Grad geneigte Linie. Diese ist, verglichen mit der durch den Nullpunkt gehenden 45 Grad-Linie, etwas nach links verschoben. Aus diesem Vergleich ergibt sich also folgendes: Das ΔV fällt stets wenig grösser oder gleich dem entsprechenden Ionisationspotential aus. — Wehrli und Bächtiger (l. c.) haben festgestellt, dass sich rechts von Punkt C (Fig. 1) an der Sonde eine anodische Glimmhaut ausbildet, woraus folgt, dass der Abszissenwert von Punkt C sicher um den Betrag der Anregungsspannung rechts vom Raumpotential liegt. Nach den zuvor angeführten Versuchen kann aber nun die obere Grenze für das Raumpotential noch enger gelegt werden. Ist doch gezeigt worden, dass Punkt C sogar um den Betrag des ersten Ionisationspotentials rechts vom Raumpotential liegen muss.

§ 5. Sondenmessungen an einer Natrium-Kleinlampe.

Nach dem Einbrennvorgang liegt bei diesen Lampen eine Gasentladung in einer praktisch reinen Natriumdampf-Füllung vor, denn der Partialdruck des zur Einleitung der Entladung vorhandenen Edelgases ist im endgültigen Betriebszustand prozentual klein und fällt überhaupt wegen der bedeutend grössern Ionisierungsspannung nicht in Betracht. Durch Vermittlung von Herrn Prof. Pirani wurde bei der Osram-Gesellschaft[1]) eine Spezialanfertigung einer Natriumlampe (Gleichstromtype) ausgeführt. Die Elektrodendistanz Kathode-Anode beträgt 30 mm, 10 mm vor der Kathode ist eine Wolframsonde von 0,125 mm Durchmesser eingeführt. — Leider hat sich diese Lampe für die in Aussicht genommenen Messungen als ungeeignet erwiesen. Diese Natriumlampe zeigt eine ausgesprochene Schwingneigung. Besonders bei Betriebstromstärken unter 1,2 Ampere ergeben sich ohne jeglichen zusätzlichen Schwingkreis niederfrequente Schwingungen, deren Frequenz je nach Betriebstromstärke 500—5000 Hertz beträgt. Ein „Knie" der Sondencharakteristik kann nicht beobachtet werden. In Fig. 15 sind 3 Sondencharakteristiken wiedergegeben. Die Ionenstromkurven Fig. 15a scheinen verlässlich zu sein. Dagegen zeigt sich bei der in Fig. 15b dargestellten Elektronenstrom-Charakteristik noch deutlich eine Spur von Schwingungen, obgleich die Entladung bei der Stromstärke 1,2 Ampere am ehesten

[1]) Herrn Prof. Pirani sowie der *Osram-Gesellschaft* sei für ihr Entgegenkommen bestens gedankt.

stabil ist. Erwähnt muss ferner werden, dass diese Charakteristik mit der, in Fig. 15a wiedergegebenen, unter gleicher Betriebstromstärke aufgenommenen Kurve II nicht im Einklang steht. Sehr wahrscheinlich zündet die Sonde bei Messung des Elektronenstromteils der (I_S, U_S)-Kurve bereits als Anode. Für eine eingehendere Diskussion sollte der Druck im Entladungsgefäss bekannt sein. Nach Rodebusch und Walters beträgt der Gas-

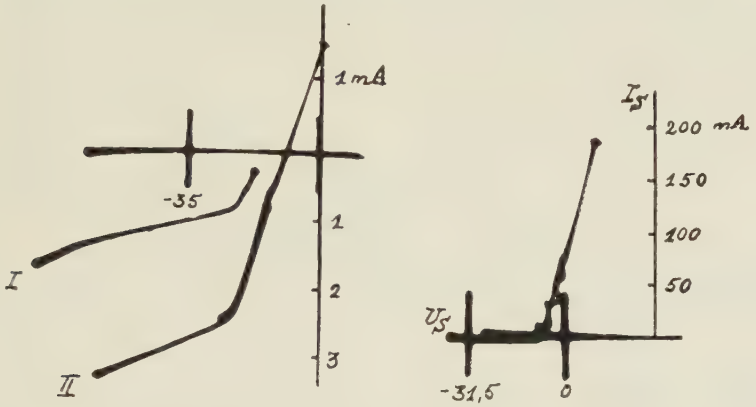


Fig. 15a. Fig. 15b.

Sondencharakteristiken einer Natrium-Kleinlampe.
Wolframsonde 0,125 mm Durchmesser.
Abstand Sonde-Kathode $\Delta l^- = 10$ mm, $l = 30$ mm.
a) Ionenstromteil, $Ra = 23\,000$ Ohm
Charakteristik I: $I = 0{,}6$ A. Charakteristik II: $I = 1{,}2$ A.
b) Elektronenstromteil, $Ra = 415$ Ohm, Betriebstromst. $I = 1{,}2$ A.

druck p ($p = p\,\mathrm{Na} + p\,\mathrm{Na_2}$) über Natrium z. B. bei einer Temperatur $T_K = 771$ Grad 3,65 mm Hg. Es ist darum anzunehmen, dass sich bei dieser Natriumlampe die Sonde innerhalb der „Abfallweite" (vgl. § 6) befindet, d. h. innerhalb eines Gebietes der Entladung, in welchem keine Sondencharakteristik vom Typus der Fig. 1 gemessen werden kann.

§ 6. Der Potentialverlauf im Wolfram-Stickstoffbogen.

Im allgemeinen Fall setzt sich die Gesamtspannung U einer Bogenentladung aus Kathoden- und Anodenfall sowie aus dem Potentialabfall innerhalb der Bogensäule zusammen. Schon früher ist von Wehrli und Bächtiger (l. c.) gezeigt worden, dass bei konstanter Stromstärke und Veränderung der Bogenlänge der Kathodenfall konstant bleibt. Wenn nun Bogenlänge-

Intervalle gefunden werden können, in welchen zudem der Anodenfall konstant bleibt, so ist in jenen Zonen ein Anwachsen der Gesamtspannung bei Vergrösserung der Elektrodendistanz einzig auf das Ansteigen des Spannungsabfalls in der Gassäule zurückzuführen. Es kann dann aus der Bogenlänge-Spannungskurve ((*U*, *l*)-Kurve) direkt die Zunahme des Spannungsabfalls in der Gassäule abgelesen werden. Gleichzeitig lässt sich daraus (aus Gründen, die weiter unten angeführt werden, allerdings nur näherungsweise) der Spannungsgradient der Bogensäule errechnen. Nun

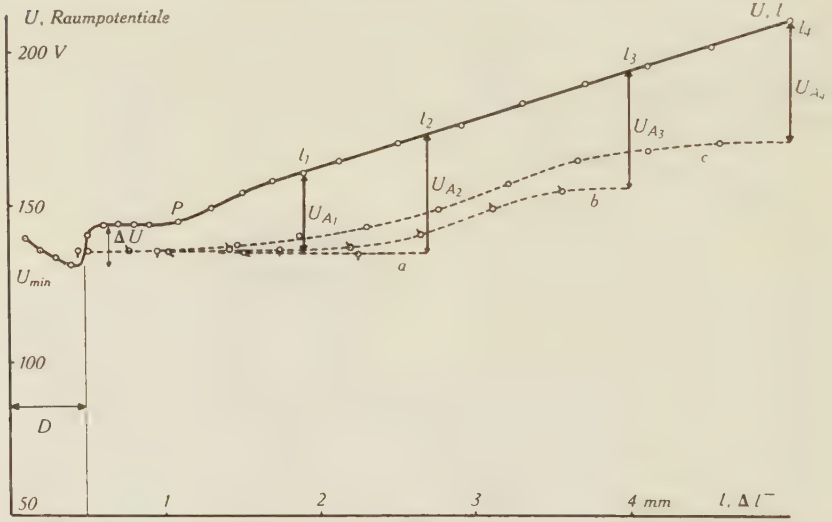


Fig. 16.

Bogenlänge-Spannungskurve und Raumpotentialverteilung bei verschiedenen Bogenlängen.

$I = 0{,}2$ A $p = 110$ mm Hg $D = 0{,}5$ mm.

Raumpotentialverteilung:

bei $l_1 = 1{,}9$ mm ○, $l_2 = 2{,}7$ mm ○ (a) $l_3 = 4$ mm ○ (b) $l_4 = 5$ mm ○ (c)

kann das Verhalten des Anodenfalls mit Hilfe von Sondenmessungen überprüft werden: Führt man bei verschiedenen Bogenlängen längs der Bogenaxe Sondenmessungen aus, so erhält man jeweilen die Grösse des Anodenfalls als Differenz zwischen der Gesamtspannung und dem nahe der Anode ermittelten Raumpotential (in das Anodenfallgebiet selbst kann die Sonde nicht eindringen, da es zu nahe vor der Anode liegt).

In Fig. 16, 17 sind typische Bogenlänge-Spannungskurven wiedergegeben (ausgezogene Kurven), und gleichzeitig sind auch die durch Sondenmessungen bei fünf verschiedenen Bogenlängen

gefundenen, gegen Kathode umgerechneten Raumpotentialwerte eingezeichnet worden (letztere Punkte sind durch gestrichelte Linien verbunden).

Im Falle der Fig. 16 wird für die drei Bogenlängen 2,7, 4 und 5 Millimeter festgestellt, dass für die entsprechenden Anodenfälle gilt: $U_{A_2} = U_{A_3} = U_{A_4} = 38$ Volt. Innerhalb dieses Bogenlängen-Intervalls ist also die Konstanz des Anodenfalls nachgewiesen worden. Der mit der Sonde für dieselben Bogenlängen gemessene Potentialverlauf ist durch die gestrichelt gezeichneten

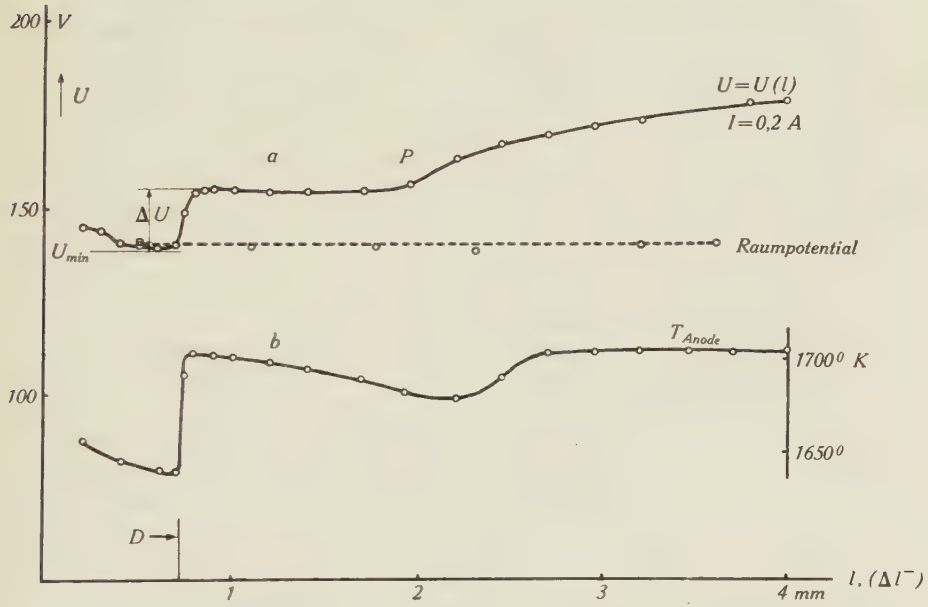


Fig. 17.

Bogenlänge-Spannungskurve, Potentialverlauf bei mittlerer Bogenlänge und Anodentemperaturkurve.

Kurven *a*, *b*, *c* (Fig. 16) dargestellt. Danach ist sowohl bei der Bogenlänge $l_3 = 4$ mm als auch bei $l_4 = 5$ mm in der mittleren Zone der Bogensäule ein Gradient vorhanden. Die Potentialkurve verläuft aber dennoch in Anoden- und Kathoden-Nähe flach, und der Gradient hat also nicht über die gesamte Bogenlänge einen konstanten Wert. Wohl ist die Zunahme der Gesamtspannung zwischen den Bogenlängen l_2 bis l_4 ausschliesslich dem Spannungsabfall in der Gassäule zuzuschreiben; aus dem linearen Anstieg der Gesamtspannung lässt sich aber nur ein mittlerer Gradient errechnen, während man über Einzelheiten des Potentialverlaufs an Hand der (U, l)-Kurve allein keinen Aufschluss erhält.

Im weitern soll nun dasjenige Bogenlänge-Intervall untersucht werden, wo noch kein Spannungsabfall in der Gassäule vorhanden ist, und wo infolge der Konstanz des Kathodenfalls eine Änderung der Gesamtspannung nur durch den Anodenfall verursacht werden kann. Dieser Bogenlängebereich liegt den Kurven

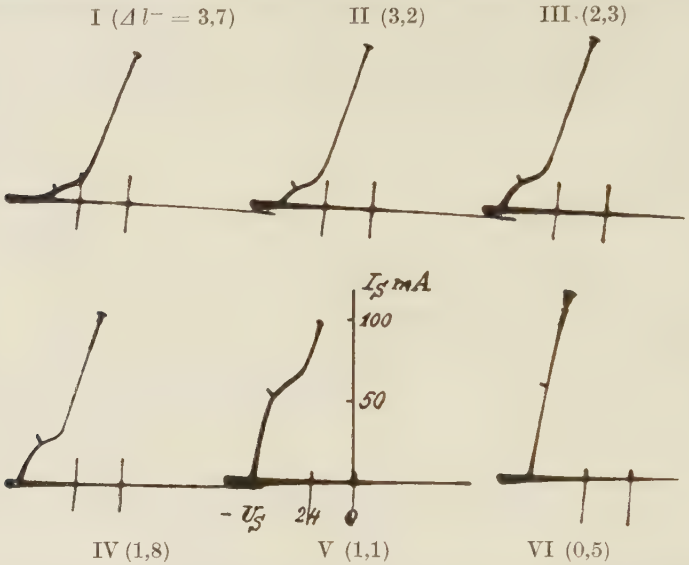


Fig. 18.

6 bei versch. Abstand Sonde-Kathode (Δl^-) gemessene Sondencharakteristiken. $p = 58$ mm, $l = 4{,}0$ mm, Halbkugelelektroden, Anode oben $I = 0{,}2$ A, Eichmarken $U_S = 0$ und -24 V.

Tabelle IV.

Umrechnung der aus Fig. 18 entnommenen Raumpotentiale in Bezug auf die Kathode.

	Δl^-	U_{Knie} geg. Anode	Gesamtsp. U	U_{Knie} geg. Kathode
I	3,7	39 V	180 V	141 V
II	3,2	39,5	180	140,5
III	2,3	45	184	139
IV	1,8	46	186	140
V	1,1	46	186	140
VI	0,5	45,5	186	140,5

in Fig. 17 zugrunde. Eine Reproduktion der sechs Sondencharakteristiken, aus welchen die Raumpotentialwerte (vgl. auch Tabelle IV) entnommen worden sind, findet sich in Fig. 18.

Betrachtet man z. B. an Hand der Kurve *a* der Fig. 17 den Bereich mittlerer Bogenlängen der (U, l)-Kurve, so stellt man folgendes fest: Die Spannung wächst zunächst bei der Bogenlänge D (der „Abfallweite") rasch um den Betrag ΔU an und bleibt dann bis zu einer Bogenlänge von ungefähr der 2,5fachen Abfallweite (2,5 D), d. h. bis zu Punkt P konstant. Nach Punkt P erfolgt erneut ein relativ rascher Anstieg, und es weist dann die (U, l)-Kurve bei noch grösserem l eine konstante Neigung auf (was speziell aus der Kurve in Fig. 16 deutlich hervorgeht). A. Günntherschulze[1]) hat diesen typischen Verlauf erstmals in der Glimmentladung festgestellt und die „Minimumspannung" U_{min} als Kathodenfall, den Wert ΔU als Anodenfall gedeutet. Auch im Wolfram Stickstoffbogen ist von P. Bächtiger[2]) ein analoger Verlauf der (U, l)-Kurve beobachtet worden. Später gelang es dann Bächtiger[3]) durch Energiebilanz quantitativ zu bestätigen, dass der Spannungsanstieg ΔU tatsächlich einer Zunahme des Anodenfalls entspricht und er konnte feststellen, dass, besonders wenn H_2 als Füllgas verwendet wird, die Anodentemperatur auch bei Punkt P der $(U, l$-)Kurve neuerdings anwächst. Das liess damals vermuten, dass dort ein weiterer Anstieg des Anodenfalls erfolgt.

Aus der gestrichelt gezeichneten Kurve der Fig. 17 ergibt sich deutlich, dass das Raumpotential gegen Kathode längs der ganzen Bogensäule praktisch identisch mit der Minimumspannung und dem Kathodenfall ist, sodass der Anstieg der (U, l)-Kurve nur dem Anwachsen des Anodenfalls zuzuschreiben ist. Dadurch ist bewiesen, dass sich der Anodenfall tatsächlich in zwei Stufen ausbildet. Diese Interpretation wird im wesentlichen auch durch den Verlauf der Anodentemperatur-Kurve (vgl. Fig. 17b) bestätigt. Entsprechend dem stufenweisen Ausbau des Anodenfalls zeigt sie sowohl bei der Distanz D als auch nach Punkt P der (U, l)-Kurve (Bogenlänge 2,5 bis 3 D) einen deutlichen Temperaturanstieg. Die Temperaturabnahme nach dem Überschreiten der Distanz D dürfte sich durch eine Verringerung der Zustrahlung von Seiten der Kathode erklären.

Die bis jetzt angeführten Messungen des Potentialverlaufs sind bei relativ grossen Bogenlängen (l gross im Vergleich zur Abfallweite D) durchgeführt worden. Bei kleinern Längen lassen die Messungen vor der Kathode auf ein Gegenfeld schliessen. Aus einer Serie von Sondencharakteristiken, die bei einem Druck

[1]) A. Günntherschulze, ZS. f. Phys. **30**, 175, 1924.
[2]) P. Bächtiger, Helv. Phys. Acta **3**, 335, 1930.
[3]) P. Bächtiger, Helv. Phys. Acta **4**, 400, 1931.

von 58 mm Hg in einem 1,9 mm langen Bogen ($D = 0{,}8$ mm) aufgenommen worden sind, und deren Reproduktion Fig. 19 zeigt, lässt sich bezüglich des Raumpotentials folgendes entnehmen: Entfernt man die Sonde von der Anode (abnehmendes Δl^-), so rückt das Knie der Sondencharakteristik (obgleich die Sonden-

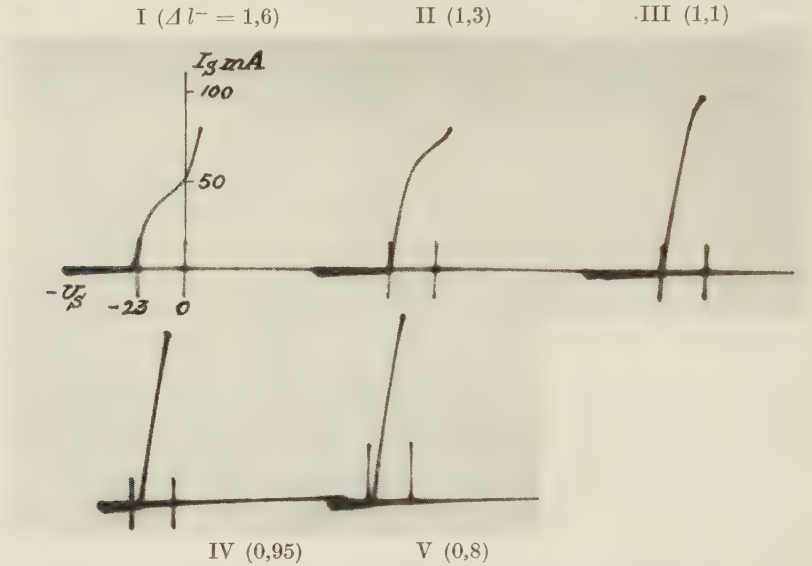


Fig. 19.

Sondencharakteristiken eines kurzen Wolfram-Stickstoffbogens. $p = 58$ mm Hg, $l = 1{,}9$ mm, Halbkugelelektroden, Anode oben, $I = 0{,}2$ A.

Tabelle V.

Umrechnung der Raumpotentiale gegen Kathode (Gegenfeld!).

Charakt. No.	Abst. Sonde-Kathode Δl^-	Raumpotent. geg. Anode	Gesamt Sp. U	Raumpotent. geg. Kathode
I	1,6 mm	17,5 V	153 V	135,5 V
II	1,3	12,5	151	138,5
III	1,1	8	150	142
IV	0,95	$U<4$	150	$U>146$
V	0,8	$U<4$	149	$U>147$

potentiale gegen die Anode erteilt werden) zu kleinern negativen Sondenspannungen (siehe auch Tabelle V). Trotzdem ein immer längeres Stück der Entladung zwischen Sonde und Anode zu liegen kommt, verringert sich die Potentialdifferenz. Rechnet

man die Sondenpotentiale gegen die Kathode um, so kommt man zu den in der letzten Kolonne in Tabelle V angeführten Daten, die in Fig. 20 in Abhängigkeit des Abstandes Sonde-Kathode graphisch aufgetragen sind.

Ein entsprechendes Gegenfeld wird auch festgestellt, wenn die Sonde ausserhalb der Bogenaxe längs der Bogensäule verschoben wird.

Bei kritischer Betrachtung der Messungen drängt sich die Frage auf, ob bei diesen kleinen Bogenlängen nicht etwa die Hauptentladung durch die Sonde verdrängt wird, und das Gegenfeld durch diese Störung vorgetäuscht wird. Diese Möglichkeit scheidet aber aus. Ergibt sich doch auch ausserhalb der Bogenaxe, wo von einer Verdrängung der Entladung nicht die Rede sein

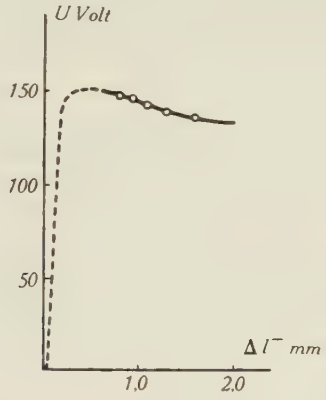


Fig. 20.

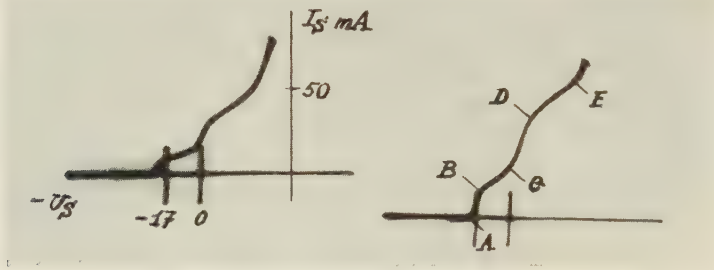
Raumpotentialverlauf bei kleinen Bogenlängen (Gegenfeld).

kann, derselbe Befund. Gerade im Bereich dieses Gegenfeldes wächst die ungeordnete Elektronenstrom-Dichte sehr stark an (Verlagerung des „Knies" zu höhern Stromwerten, wenn Δl^- abnimmt, vgl. Fig. 19). Dies kann man leicht verstehen, da ja hier die Elektronen aufgehalten werden und nur infolge Diffusion weiterströmen. Es ist bemerkenswert, dass das Gegenfeldgebiet in die Zone des negativen Glimmlichts und Faraday'schen Dunkelraums fällt. Die Bogenentladung zeigt hier ein analoges Verhalten wie die Glimmentladung, in deren Faraday'schem Dunkelraum ebenfalls ein Gegenfeld nachgewiesen worden ist[1]).

[1]) K. T. Compton, L. A. Turner und Mc. Curdy, Phys. Rev. **24**, 597, 1924.

§ 7. Sondencharakteristiken, (U, l)-Kurven und die Ausbildung des Anodenfalls.

Wie in § 6 festgestellt worden ist, bildet sich der Anodenfall in zwei Stufen aus, was sich an der Bogenlänge Spannungskurve durch zweimaliges rasches Ansteigen der Spannung bemerkbar macht. Man kann sich nun fragen, ob die stufenweise Anodenfall-Ausbildung auch zum Vorschein kommt, wenn die Sonde



I (d = 2,5 mm) II (d = 1,5 mm)

Fig. 21.

Sondencharakteristiken mit zweistufiger Anodenfall-Ausbildung Wolfram-Stickstoffbogen, p = 60 mm Hg, Halbkugelelektroden, Anode oben. I = 0,15 A, Bogenlänge l = 0,7 mm, Δl^- = 0,35 mm. Sonde um die Strecke d ausserhalb der Bogenaxe.

Tabelle VI.

Auswertung der Charakteristiken Fig. 21.

Potential in Punkt	Charakteristik I	Charakteristik II
A	− 22 V	− 20 V
B	− 19,5	− 17
C	− 3	0
D	+ 3,5	+ 9
E	26,5	33

zur Anode wird. Bei der (U, l)-Kurve tritt die zweite Anodenfall-Stufe erst dann auf, wenn eine gewisse Bogenlänge überschritten wird. Es liegt darum nahe, dass auch bei der Sondencharakteristik eine Andeutung vom stufenweisen Aufbau des Anodenfalls am ehesten dann zu erwarten ist, wenn die Sonde durch seitliche Verschiebung oder durch genügend grosses Δl^- um den 2,5- bis 3fachen Betrag der Abfallweite von der Kathode entfernt ist.

Tatsächlich wird ein entsprechender Effekt beobachtet. Es treten dann Sondencharakteristiken mit zwei ausgeprägten „knieähnlichen" Krümmungsmaxima auf (vgl. Fig. 21).

Man kann diesen Verlauf der (I_S, U_S)-Charakteristik folgendermassen erklären: Links von Punkt A (Fig. 21) ist die Sonde so stark negativ, dass praktisch keine Elektronen auftreffen können, und darum der Ionenstrom überwiegt. Wird dann aber die Sonde positiver, so laufen zwischen den Punkten A und B zunächst die raschesten und dann gegen Punkt B hin auch die langsamern Elektronen auf. Ist die Sonde sogar positiver als das Raumpotential, so werden alle Elektronen beschleunigt. Während aber im Bereich $B-C$ der Charakteristik die Elektronengeschwindigkeiten noch unterhalb der Ionisierungsspannung $V_i I$ liegen, wird dieser Wert oberhalb C überschritten. In jener Zone verliert die Mehrzahl der Elektronen ihre Geschwindigkeit durch unelastische Stösse. Infolge der Ionisation steigt dort der Elektronenstrom stark an. Wenn nun die Sonde weiterhin positiver wird, so wächst nach Punkt D die Elektronengeschwindigkeit erneut an, bis sich nach Punkt E wiederum eine besonders starke Ionisation einstellt. Hier hat ein Teil der Elektronen schon zum zweiten Mal die Geschwindigkeit $V_i I$ erreicht, und ein Rest ist eventuell um den Betrag der höhern Ionisationsstufe $V_i II$ beschleunigt worden. Besonders einfach und übersichtlich müssten die Verhältnisse bei vollkommen homogener Geschwindigkeit liegen; es würden dann die Potentialdifferenzen $A-C$ und $C-E$ genau mit dem Ionisationspotential übereinstimmen.

Im praktischen Fall, d. h. bei inhomogener aber kleiner Elektronengeschwindigkeit ist, wie man aus Fig. 21 ersieht, der stufenweise Aufbau der Charakteristik noch deutlich erkennbar. Aus Charakteristik I (Fig. 21) ergibt sich für die Differenz $B-C$ 16,5 Volt, was recht gut dem Ionisierungspotential $V_i I$ des N_2 Moleküls (15,8 Volt) entspricht. Die Potentialdifferenz $D-E$ beträgt 23 Volt. Während bei der (U, l)-Kurve der etappenweise Aufbau des Anodenfalls nur indirekt festgestellt wird, indem dort die Spannung U Funktion der Bogenlänge ist, die Stromstärke aber konstant gehalten wird, kann hier an der Sonde dieser Effekt einwandfrei direkt beobachtet werden.

§ 8. Die Lage des Raumpotentials auf der Sondencharakteristik.

Ausgehend von den besprochenen Messergebnissen lässt sich folgendes feststellen: Die Festlegung des Raumpotentials nach Langmuir (vgl. § 1) ist auch bei hohen Drucken zulässig. Da die vorliegende Arbeit einen gewissen Abschluss in der Diskussion über die Lage des Raumpotentials auf der Sondencharakteristik bei hohen Drucken darstellt, soll im folgenden kurz gezeigt werden,

wie sich die Lösung der Raumpotentialfrage schrittweise entwickelt hat:

Im Jahre 1930 legt Wehrli (l. c.) das Raumpotential, gestützt auf Glühsondenmessungen, in das obere Knie D (Fig. 21); das untere Knie B wird dabei als primäre von der Kathode emittierte Elektronengruppe gedeutet.

1931 können Wehrli und Bächtiger (l. c.) das Raumpotential unabhängig von Glühsondenmessungen innerhalb zweier Schranken eingrenzen. Ausgehend von der behinderten Bogenentladung wird festgestellt, dass das Raumpotential in der Nähe von dem Knie B liegen muss. Die primäre translatorische Elektronengruppe muss damit im Ionenstromteil der Sondencharakteristik gesucht werden. Ihre Feststellung ist dann tatsächlich Wehrli und Bächtiger[1]) im Jahre 1932 gelungen.

Durch die Messungen am Kohlebogen (§ 4) können die Schranken für das Raumpotential enger gelegt werden. Dieses liegt mindestens um den Betrag des Ionisationspotentials (frühere Schranke Anregungsspannung) unterhalb Punkt C (Fig. 21). Schliesslich führt die Ausbildung des Anodenfalls in zwei Stufen (§ 6 und 7) zur Erklärung des Knies D, sodass heute feststeht, dass das Raumpotential unbedingt in der Nähe von Punkt B liegen muss.

Es lässt darum auch die Abnahme der Kniehöhe bei Vergrösserung des Abstandes Sonde-Kathode, die sowohl im Kohle- als auch Wolfram-Stickstoffbogen festgestellt wird, einen wichtigen Schluss auf den Verlauf der Elektronenstromdichte zu. Die ungeordnete Elektronenstromdichte nimmt von der Kathode ausgehend längs der Bogenaxe rasch ab. Die Tatsache, dass Punkt B der Sondencharakteristik nie um wesentlich mehr als 5 Volt vom statischen Sondenpotential A abweicht, führt zum Schluss, dass die früher, statisch festgestellten Sondenpotentiale maximal um etwa 5 Volt vom Raumpotential abweichen.

§ 9. Zusammenfassung.

1. Zur raschen Messung von Sondencharakteristiken wird eine geeignete Schaltung entwickelt; diese ermöglicht im Sondenkreis einer Gasentladung dynamische Charakteristiken aufzunehmen. Als Messinstrument dient eine Braun'sche Röhre. Die Charakteristiken können photographisch registriert werden.

2. Bei höhern Messfrequenzen unterscheiden sich statisch und dynamisch gemessene Charakteristiken; darum wird zunächst festgestellt, bei welcher kritischen Frequenz sich diese Abweichun-

[1]) M. Wehrli und P. Bächtiger, Helv. Phys. Acta **5**, 106, 1932.

gen („Frequenzeffekt 1—3“) einzustellen beginnen. Die drei verschiedenen Abweichungen werden näher untersucht; ihre Entstehung kann mit Hilfe der thermischen und elektrischen Trägheit der Bogenentladung erklärt werden.

3. Die Messmethode wird auf den relativ unstabilen Kohlebogen angewendet (die Messfrequenz 50 Hertz liegt unterhalb der kritischen Frequenz). Es gelingt Elektronenstromdichten und Raumpotentiale zu bestimmen. Im Dochtkohlebogen werden die Potentialmessungen von Hagenbach und Wehrli bestätigt. Die kurze Messdauer ermöglicht es, in Lichtbogen mit salzgetränkten Elektroden zu messen; dabei wird ein Effekt beobachtet, welcher mit Hilfe der Änderung der Ionisierungsspannung des Bogengases erklärt werden kann.

4. Es werden an einer Natrium-Kleinlampe Sondencharakteristiken gemessen.

5. Aus Sondenmessungen in verschieden langen Wolfram-Stickstoffbogen ergibt sich der Potentialverlauf für verschiedene Bogenlängen. Dabei gelingt es definitiv zu beweisen, dass sich der Anodenfall bei Vergrösserung der Bogenlänge in zwei Stufen ausbildet. Als maximaler Anodenfall wird 38 Volt gemessen. Dieser Wert stellt sich nach Ausbildung der zweiten Stufe des Anodenfalls ein und bleibt dann oberhalb einer bestimmten Bogenlänge konstant. Bei kurzen Bogen wird vor der Kathode ein Gegenfeld festgestellt.

6. Wie an der Anode, so bildet sich der Anodenfall auch an einer ausreichend positiv geladenen Sonde in zwei Stufen aus.

7. Das in dieser Arbeit vorliegende experimentelle Material ermöglicht, unter Zuziehung früherer Ergebnisse, auch bei hohen Drucken das Raumpotential auf der Sondencharakteristik endgültig festzulegen.

Diese Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Prof. Dr. Wehrli im Physikalischen Institut der Universität Basel ausgeführt. Dem Vorsteher des Instituts, Herrn Prof. Dr. Hagenbach möchte ich für die Überlassung des Institutsmaterials und für sein Interesse am Fortgang der Arbeit meinen wärmsten Dank aussprechen. Herr Professor Wehrli hat die Arbeit durch viele Ratschläge und Anregungen unterstützt, wofür ich ihm herzlichst danke.

Basel, Physikalische Anstalt.

Curriculum vitae.

Ich, Jakob Dürrwang, wurde am 23. April 1911 als Sohn des Jakob Dürrwang, Polizei-Beamter, und seiner 1931 verstorbenen Gattin Emilie geb. Birmann, in Basel geboren. Mein Vater lebt heute noch in Basel.

Von 1917—1929 besuchte ich die Basler Schulen. Im März 1929 bestand ich an der ehemaligen Obern Realschule das Maturitätsexamen.

Vom S.-S. 1929 bis zum W.-S. 1934/35 studierte ich in Basel. Im S.-S. 1932 war ich Assistent an der Physikalischen Anstalt.

Ich besuchte Vorlesungen und Praktika der folgenden Dozenten: P. Buchner, Fr. Fichter, A. Hagenbach, W. Matthies, A. Ostrowski, H. Rupe, O. Spiess, M. Wehrli, H. Zickendraht.

Die vorliegende Arbeit entstand unter Leitung von Herrn Prof. M. Wehrli. Meinen Lehrern, insbesondere den Herren Professoren A. Hagenbach und M. Wehrli danke ich für ihre Anregungen und Ratschläge, die mir während meines Studiums zuteil wurden.